

## ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 656.051

**МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАТРИМКИ ПІШОХОДІВ ПРИ ПЕРЕХОДІ ВУЛИЦЬ І ДОРІГ ПОЗА ПІШОХІДНИМ ПЕРЕХОДОМ****П.Ф. Горбачов, проф., д.т.н., О.В. Макаричев, доц., д.ф.-м.н., Г.В. Атаманюк, асп.,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

*Анотація.* Обґрунтовується доцільність організації дорожнього руху в місцях пересічення транспортних і пішохідних потоків з точки зору витрат часу учасників руху на подолання конфліктної ділянки. Описується аналітична модель часу затримки пішоходів для найпростішого випадку – при переході вулиці без позначеного пішохідного переходу.

*Ключові слова:* модель часу затримки, математичне очікування, тимчасове вікно, найпростіший потік, пішохід, автомобіль, інтенсивність, ймовірність.

**МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДЕРЖКИ ПЕШЕХОДОВ ПРИ ПЕРЕХОДЕ УЛИЦ И ДОРОГ ВНЕ ПЕШЕХОДНОГО ПЕРЕХОДА****П.Ф. Горбачёв, проф., д.т.н., А.В. Макаричев, доц., д.ф.-м.н., А.В. Атаманюк, асп.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**

*Аннотация.* Обосновывается целесообразность организации дорожного движения в местах пересечения транспортных и пешеходных потоков с точки зрения затрат времени участников движения на преодоление конфликтного участка. Описывается аналитическая модель времени задержки пешеходов для простейшего случая – при переходе улицы без обозначенного пешеходного перехода.

*Ключевые слова:* модель времени задержки, математическое ожидание, временное окно, простейший поток, пешеход, автомобиль, интенсивность, вероятность.

**MODEL OF DETERMINING THE PEDESTRIANS' DELAY IN THE CROSSING OF STREETS AND ROADS OUTSIDE THE PEDESTRIAN CROSSING****P. Horbachov, DSc., Prof., A. Makarichev, DSc., Assoc. Prof., A. Atamanyuk,  
Postgraduate Student, Kharkiv National Automobile and Highway University**

*Abstract.* The rational organization of the junction of the transport and pedestrian flows on the urban streets and intercity roads based on the criterion of traffic participant's summary time consumption for overcoming the conflict area is substantiated. The analytical model of pedestrian's delay while crossing the urban street or intercity road without the designated pedestrian crossing is described.

*Key words:* model of time delay, expected value, time interval, the simplest flow, pedestrian, automobile, intensity, probability.

**Вступ**

Питання раціональної організації транспортного процесу в містах та регіонах постійно виникають перед органами місцевого само-

врядування. Вирішуються вони в основному за допомогою колективного обговорення альтернативних варіантів вирішення питання, в рамках діючої нормативної бази, що далеко не завжди приводить до бажаного

результату – підвищення рівня задоволення транспортних потреб жителів і гостей міста (регіону). Проблеми прийняття зважених рішень у сфері організації дорожнього руху (ОДР) багато в чому зумовлені недостатнім ступенем наукового опрацювання цих питань, оскільки діючі нормативи пропонують дуже широкі діапазони використання різних способів організації руху транспортних засобів (ТЗ) і пішоходів зі значними пересіченнями цих діапазонів між собою. Це обумовлено недостатнім рівнем теоретичного підґрунтя проектних рішень та найбільшою мірою стосується взаємодії транспортних і пішохідних потоків на перегонах дорожньої мережі. У цьому напрямі фахівцями в основному досліджуються причини конфліктів між пішохідними і транспортними потоками в зоні перехресть.

Визначення наслідків взаємодії транспортних і пішохідних потоків, з точки зору витрат часу учасників руху на подолання конфліктної ділянки, дозволить визначити чіткі кількісні межі ефективного використання різних способів організації переходу пішоходів на перегоні вулиці або дороги.

### Аналіз публікацій

В Україні на сьогодні не існує сучасного нормативного документа, в якому зазначалися б єдині умови застосування різних типів пішохідних переходів. Ці умови розглядаються в декількох чинних в Україні нормативних документах: настанов з регулювання дорожнього руху в містах, 1974 рік [1]; методичних рекомендаціях з регулювання пішохідного руху, 1977 рік [2]; ДБН В.2.3-5-2001 «Вулиці та дороги населених пунктів», 2001 рік [3]; ДСТУ 4092-2002 «Світлофори дорожні», діє з 2003 року [4], та Правилах дорожнього руху України [5].

У ДБН В.2.3-5-2001 [3] надаються загальні вимоги до організації пішохідних переходів, але у ньому не містяться норми, які б описували граничні умови переходу від нерегульованого до регульованого пішохідного переходу на перегонах вулиць, тобто не надається детальний опис параметрів (інтенсивність руху пішоходів, інтенсивність транспортних засобів, затримки транспорту, затримки пішоходів), за яких у новому місці доцільно організувати пішохідний перехід. Частково подібні норми містяться у чинному в Україні

ДСТУ 4092-2002 [4], котрий надає значення інтенсивності руху пішохідних і транспортних потоків, при перевищенні яких на пішохідних переходах, що розташовані на перегонах міських вулиць, необхідно вводити світлофорне регулювання:

- інтенсивність руху транспорту – 600 од./год у двох напрямках;
- інтенсивність руху пішоходів через проїжджу частину – 150 піш./год в одному найбільш завантаженому напрямку.

Зазначені показники інтенсивності руху пішохідного і транспортного потоку є граничними умовами застосування нерегульованих і регульованих пішохідних переходів на перегонах міських вулиць. Але ці рекомендації не містять у собі критеріїв організації власне нерегульованого пішохідного переходу та меж застосування різних форм світлофорного регулювання: з викликальним пристроєм або без нього, з жорстким або гнучким циклом світлофорного регулювання. До того ж вони не супроводжуються об'єктивними оцінками витрат часу учасників руху, не враховують розподілу інтенсивності транспортних потоків протягом доби та мають апріорний характер, що вимагає надання необхідних оцінок.

Слід особливо вказати, що у ДСТУ 4092-2002 [4] взагалі не розглядається ситуація неорганізованого пішохідного переходу через вулицю, а саме з неї необхідно починати формування альтернативних варіантів організації взаємодії пішохідних та транспортних потоків. Ця ситуація передбачена діючими правилами дорожнього руху (ПДР) України [5], де пішоходу, після того, як він упевниться у відсутності небезпеки, дозволяється переходити дорогу під прямим кутом до краю проїзної частини в місцях, де її добре видно в обидва боки, в зоні видимості немає переходу або перехрестя, а дорога має не більше трьох смуг руху для обох його напрямків.

У настанові з регулювання дорожнього руху у містах [1] для такого випадку наводиться лише твердження, що непозначені пішохідні переходи допускаються на вулицях і дорогах місцевого руху за інтенсивності транспортного руху до 300 од./год сумарно в обох напрямках і відстаней між перехрестями не більше 200 м, а в інших випадках облаштовуються позначені пішохідні переходи. Але згідно з чинними в Україні ПДР [5] пішохід-

ний перехід на перегоні міської вулиці не може бути непозначеним – це не відповідає терміну «пішохідний перехід». У «Методичних рекомендаціях з регулювання пішохідного руху» [2] міститься таке визначення: «Пішохідним переходом називається спеціально позначена розміткою «зебра» або знаком 4.13 ділянка проїжджої частини або спеціальна інженерна споруда (підземний перехід або пішохідний місток), призначені для руху пішоходів». Тобто саме поняття непозначеного пішохідного переходу, яке застосовується у настанові [1], не відповідає методичним рекомендаціям з регулювання пішохідного руху, 1977 р. [2], та чинним ПДР України [5]. Це протиріччя та відсутність кількісних оцінок порівняльної ефективності варіантів облаштування пішохідного переходу на перегоні за його відсутності також викликає сумніви у достатній обґрунтованості настанови [1] та рекомендацій [2].

Проаналізувавши нормативну базу України, можна зробити висновок, що у нормативних документах [1–4], котрі стосуються застосування нерегульованих і регульованих пішохідних переходів, сумнівів не викликають тільки норми, в яких описується установка пішохідних переходів у різних рівнях із проїжджою частиною вулиці або дороги (підземні пішохідні тунелі, надземні пішохідні містки, переходи, суміщені з транспортними вузлами в різних рівнях).

Усі інші умови застосування різних типів пішохідних переходів, які наведені вище, або розглянуті недостатньо повно, або викликають сумніви в доцільності їх застосування у сучасних умовах руху. Схожу оцінку існуючої в Україні нормативної бази по застосуванню різних типів пішохідних переходів на перегонах вулиць розділяють автори наукової публікації [6].

На жаль, публікацій українських вчених із проблеми визначення граничних умов застосування різних типів пішохідних переходів на перегонах міських вулиць існує зовсім не багато. Окрім наукової публікації [6], інтерес викликає також робота [7], в котрій описується науковий підхід до визначення граничних умов застосування різних типів пішохідних переходів на перегонах міських вулиць. У ній якість організації дорожнього руху в зоні пішохідного переходу оцінюється за величиною втрат у дорожньому русі – чим

меншими є втрати, тим вищою є якість. Також зроблено короткий огляд складу втрат, які містять втрати від викидів шкідливих речовин в навколишнє середовище, від дорожньо-транспортних пригод (ДТП), економічні та соціальні втрати.

Економічні втрати розраховуються залежно від сумарних затримок учасників дорожнього руху: пішоходів, пасажирів та водіїв на пішохідному переході (год./рік) та вартості однієї години затримки (грн./год.). Хоча й існує повний опис розрахунку економічних втрат від сумарних затримок учасників дорожнього руху на пішохідному переході, у роботі не були показані розрахунки втрат від викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище та втрат від дорожньо-транспортних пригод. Проте у залежності (1), яку наводять автори, ці показники необхідні для визначення доцільності застосування світлофорного регулювання на пішохідних переходах:

$$\frac{S_{\text{ЕК}}^{\text{H}} + S_{\text{ДТП}}^{\text{H}} + S_{\text{ЕКОЛ}}^{\text{H}}}{S_{\text{ЕК}}^{\text{P}} + S_{\text{ДТП}}^{\text{P}} + S_{\text{ЕКОЛ}}^{\text{P}} + S_{\text{СФР}}} \geq 1, \quad (1)$$

де  $S_{\text{ЕК}}^{\text{H}}, S_{\text{ЕК}}^{\text{P}}$  – економічні втрати в дорожньому русі на нерегульованому пішохідному переході та при введенні на пішохідному переході світлофорного регулювання, грн.;  $S_{\text{ДТП}}^{\text{H}}, S_{\text{ДТП}}^{\text{P}}$  – втрати від ДТП на нерегульованому пішохідному переході та при введенні на пішохідному переході світлофорного регулювання, грн.;  $S_{\text{ЕКОЛ}}^{\text{H}}, S_{\text{ЕКОЛ}}^{\text{P}}$  – втрати від викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище в дорожньому русі на нерегульованому пішохідному переході та при введенні на пішохідному переході світлофорного регулювання, грн.;  $S_{\text{СФР}}$  – загальні приведені витрати на установку та експлуатацію технічних засобів світлофорного регулювання, грн.

У підсумку автори зупинилися на економічних втратах у дорожньому русі, посилаючись на те, що масштаби економічних втрат значно перевищують втрати від ДТП та від викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище разом узяті. Але, за наявності опису розрахунків сумарних затримок всіх учасників дорожнього руху (пішоходи, пасажирів, водії), авторами не були показані методи розрахунку середньої затримки одного пішо-

хода і одного транспортного засобу на пішохідному переході, а саме ці параметри у першу чергу необхідні для розрахунку сумарних затримок. Тому в цій роботі [7] і вказується, що завдання визначення граничних умов застосування нерегульованих пішохідних переходів зводиться до визначення значень параметрів інтенсивності руху пішоходів, транспорту через пішохідний перехід у годину пік, за яких ліва частина нерівності (1) буде дорівнювати одиниці.

А для вирішення цього завдання необхідно вміти визначати середні величини затримки транспорту і пішоходів при нерегульованому і регульованому дорожньому русі на пішохідному переході.

Що стосується інших робіт, то досить детально визначення граничних умов застосування різних типів пішохідних переходів на перегонах міських вулиць наводиться в дисертаційних дослідженнях деяких російських вчених: Н.А. Слободчикова [8], М.Г. Симуль [9], Є.М. Чикаліна [10]. У цих роботах досліджувалися процеси руху пішохідних і транспортних потоків на пішохідних переходах в окремо взятому місті, в роботах [8] та [10] – у м. Іркутськ; в роботі [9] – у м. Омськ. Але в них не враховувалось усе різноманіття місць розташування пішохідних переходів: на перегоні між нерегульованими перехрестями, на перегоні між регульованими перехрестями, біля зупинок маршрутного пасажирського транспорту т. ін. Використаний у цих роботах аналітичний апарат є недостатньо обґрунтованим та містить суттєві неточності. Внаслідок цього у роботі [9] рекомендації із застосування нерегульованих пішохідних переходів у значній мірі відрізняються від подібних рекомендацій у роботі [10].

Загалом, на основі аналізу наведених наукових публікацій, можна зробити висновок, що проблему визначення граничних умов використання різних способів організації перетину пішоходами перегонів міських вулиць досліджено ще недостатньо повно. Найбільшою мірою це стосується відсутності точного аналітичного апарату, який адекватно описує затримки ТЗ та пішоходів у містах перетинання транспортних та пішохідних потоків.

#### **Мета і постановка завдання**

Загальним вирішенням питання організації руху пішоходів є аналітичні залежності ви-

трат часу пішоходів і транспортних засобів на подолання місць пересічення напрямків руху транспортних та пішохідних потоків залежно від їх інтенсивності, для різних способів організації руху: поза пішохідним переходом, на нерегульованих пішохідних переходах, на регульованих пішохідних переходах з викликальним пристроєм або без нього, з жорстким або гнучким циклом світлофорного регулювання.

У результаті розробки такого аналітичного апарату створюється можливість визначення меж раціонального використання кожного з перелічених способів організації взаємодії транспортних та пішохідних потоків, які забезпечують мінімальні витрати учасників руху у відповідних містах.

Загальноприйнятою та надійною основою створення аналітичного апарату розрахунків часу затримки ТЗ і пішоходів є гіпотеза про відповідність умов виникнення потоків цих учасників руху умовам виникнення найпростішого потоку.

Ця гіпотеза виглядає правдоподібною у багатьох випадках завдяки тому, що найпростіший потік виникає як результат накладання багатьох рідких подій [11], а поява кожного з учасників руху на конкретній ділянці транспортної мережі у короткий проміжок часу взаємодії з конкурентним потоком є дійсно рідкою подією для них. Виключенням може вважатися лише ситуація із транспортними або пішохідними потоками біля перехресть вулиць, оскільки останні слугують накопичувачами для ТЗ і пішоходів та можуть суттєво змінювати параметри цих потоків при наближенні або віддаленні від них.

Але тут слід відзначити, що перехрестя вулиць або доріг є досить добре проробленими елементами вулично-дорожньої мережі, як з точки зору транспортних потоків, так і з точки зору врахування інтересів пішоходів на них. Тому як основний напрям досліджень у даній та наступних роботах взято випадок організації взаємодії пішохідних та транспортних потоків на перегонах вулиць та доріг, поза зоною впливу перехресть на параметри потоків. Для цього випадку найпростіший потік ТЗ та пішоходів є надійною основою для складання аналітичного апарату розрахунків часу затримки учасників руху.

Першим кроком на шляху створення шуканих аналітичних моделей є розгляд ситуації пересічення пішоходами проїжджої частини вулиці або дороги поза пішохідним переходом, яка передбачена ПДР та є достатньо частим випадком як у міських, так і у позаміських умовах. У цій ситуації перевагу в русі мають водії ТЗ, тобто пішохід повинен пропустити всі ТЗ та не створювати їм перешкод. Це приводить до того, що ТЗ не затримуються у місцях пересічення проїжджої частини пішоходами та не витрачають зайвого часу на очікування можливості проїзду. Тобто всі негативні наслідки, викликані пересіченням пішоходами проїжджої частини вулиці або дороги поза пішохідним переходом стосуються лише пішоходів й саме для них необхідно визначити час затримки при пересіченні проїжджої частини вулиць та доріг.

Ця задача вирішується для випадку, коли всі учасники руху, як пішоходи, так і водії ТЗ, безумовно виконують вимоги ПДР України, що створює можливості для однозначного подання стратегій поведінки учасників руху в різних випадках. Це також дозволяє вважати повністю врахованими вимоги забезпечення безпеки дорожнього руху. Згідно з цією умовою в роботі вважається, що при переході проїжджої частини вулиці або дороги поза пішохідним переходом пішохід очікує такого інтервалу часу між автомобілями, якого буде достатньо для переходу зі звичною для нього швидкістю руху.

#### Модель часу затримки пішоходів при переході вулиці поза пішохідним переходом

У прийнятих умовах час затримок пішоходів дорівнює часу очікування кожним пішоходом тимчасового вікна, необхідного для пересічення ним проїжджої частини на перегонах поза пішохідним переходом. Цей час залежить лише від інтенсивності найпростішого потоку руху автомобілів в обох напрямках, які перешкоджають вільному переходу дороги пішоходом, та не залежить від кількості пішоходів, що скористаються цим вікном.

Найпростішою характеристикою затримок пішоходів є математичне очікування часу очікування можливості переходу. Для того щоб знайти залежність середнього часу затримки від інтенсивності руху автомобілів,

слід виходити з відповідності часу між проїздом сусідніх у потоці автомобілів показниковому закону розподілу, яка впливає з припущення про найпростіший потік автомобілів на перегонах вулиць та доріг [11].

Нехай час  $\zeta$  між появою сусідніх автомобілів у місці переходу має показниковий розподіл з параметром  $\mu > 0$ . Нехай час  $\tau$  тривалості переходу пішоходів через дорогу є випадковою величиною та має при цьому функцію розподілу  $G(t)$ . Пішохід підходить до місця можливого переходу через дорогу та, якщо  $\tau < \zeta$ , він її благополучно переходить, у силу відсутності післядії для показникового розподілу. Ймовірність цієї події дорівнює

$$p = P\{\tau < \zeta\} = \int_0^{\infty} e^{-\mu t} \cdot g(t) dt, \quad (2)$$

де  $g(t)$  – функція щільності розподілу часу переходу пішоходів через дорогу;  $\mu$  – інтенсивність руху потоку автомобілів, авт./с;  $\tau$  – час переходу пішохода через дорогу, с.

І насправді, за умови, що час переходу пішохода дорівнює  $t$ , ймовірність, що за цей час  $t$  не з'явиться автомобіль у місці можливого переходу, в силу відсутності післядії для показникового розподілу дорівнює  $e^{-\mu t}$ , і цю умовну ймовірність необхідно помножити на ймовірність умови  $g(t)$  і всі такі добутки інтегрувати за всілякими значеннями часу переходу  $t > 0$  [11].

Якщо ж  $\tau \geq \zeta$ , тобто час переходу не менше, ніж час до появи чергового автомобіля у місці можливого переходу, то пішохід чекає на зручний для переходу момент.

Отже, ймовірність переходу для навмання обраного пішохода дорівнює

$$p = \int_0^{\infty} e^{-\mu t} \cdot g(t) dt. \quad (3)$$

Тоді ймовірність  $q$  очікування проїзду чергового автомобіля навмання обраним пішоходом дорівнює:

$$q = 1 - p = \int_0^{\infty} [1 - e^{-\mu t}] \cdot g(t) dt. \quad (4)$$

Наступним є головне питання, а яким є час очікування успішного переходу для навманя обраного пішохода. Це, взагалі кажучи, невід’ємна випадкова величина та для її характеристики необхідно знайти її функцію розподілу, або безпосередньо, або у термінах перетворення Лапласа, тобто твірної функції моментів. На цій основі можна визначити необхідні числові характеристики математичного очікування, дисперсію і т.п.

Для цього необхідно задати значення  $\tau > 0$  для часу переходу пішоходом дороги й за цієї умови знайти розподіл для кількості пропущених машин за час очікування до моменту переходу дороги.

Ймовірність переходу дороги, згідно з показниковим розподілом інтервалів часу між автомобілями, дорівнює

$$p(\tau) = e^{-\mu\tau}. \quad (5)$$

Ймовірність очікування перетину місця переходу черговим автомобілем дорівнює

$$p\{\zeta \leq \tau\} = 1 - e^{-\mu\tau} = 1 - p(\tau) = q(\tau). \quad (6)$$

Умовний розподіл для кількості пропущених автомобілів, рівної  $k$ , за час очікування переходу має вигляд

$$p_k(\tau) = [q(\tau)]^k \cdot p(\tau), \quad (7)$$

де  $k = 0, 1, 2, \dots$

Дійсно, ймовірність того, що пішохід пропустить рівно  $k$  машин в силу незалежності ймовірностей, дорівнює добутку двох випадкових подій: що пішохід пропустить перші  $k$  автомобілів (ймовірність цієї події  $[q(\tau)]^k$ ) і пішохід не пропустить  $k + 1$ -й автомобіль, а здійснить перед ним перехід (ймовірність цієї події  $p(\tau)$ ).

Далі визначається умовний розподіл часу  $\zeta_\tau$  очікування проїзду чергового автомобіля за умови, що він не більше  $\tau$ , тобто нас цікавить умовна ймовірність

$$F_\tau(t) = p\{\zeta_\tau \leq t\} = p\{\zeta \leq t | \zeta \leq \tau\}. \quad (8)$$

Якщо час  $\tau$  переходу дороги зафіксований за формулою умовної ймовірності [11]

$$p\{\zeta \leq t | \zeta \leq \tau\} = \frac{p\{\zeta \leq t, \zeta \leq \tau\}}{p\{\zeta \leq \tau\}} = \begin{cases} \frac{1 - e^{-\mu t}}{1 - e^{-\mu\tau}}, & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & t > \tau \end{cases}, \quad (9)$$

умовний розподіл  $F_\tau(t) = p\{\zeta_\tau \leq t\}$  для умовного часу  $\zeta_\tau$  має вигляд

$$F_\tau(t) = \begin{cases} \frac{1 - e^{-\mu t}}{1 - e^{-\mu\tau}}, & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & t > \tau. \end{cases} \quad (10)$$

Математичне сподівання для часу очікування проїзду чергового автомобіля за умови, що воно не більше  $\tau$ , визначається з

$$M_\zeta(\tau) = \int_0^\tau t \cdot dF_\tau(t) = \int_0^\tau \frac{t\mu e^{-\mu t}}{1 - e^{-\mu\tau}} dt = \frac{1}{1 - e^{-\mu\tau}} \int_0^\tau t\mu e^{-\mu t} dt. \quad (11)$$

Інтеграл (11) вирішується інтегруванням за частинами

$$\begin{aligned} \int_0^\tau t\mu e^{-\mu t} dt &= t \left( -\frac{e^{-\mu t}}{\mu} \right) \Big|_0^\tau - \int_0^\tau \left( -\frac{e^{-\mu t}}{\mu} \right) \mu dt = \\ &= -\tau e^{-\mu\tau} - 0 + \left( -\frac{e^{-\mu t}}{\mu} \right) \Big|_0^\tau = -\tau e^{-\mu\tau} - e^{-\mu\tau} + \\ &+ \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu} (1 - e^{-\mu\tau} - \mu\tau e^{-\mu\tau}). \end{aligned} \quad (12)$$

Отже, умовне математичне сподівання часу проїзду чергового автомобіля за умови, що воно не більше часу переходу  $\tau$ , дорівнює:

$$M_\zeta(\tau) = \frac{1 - e^{-\mu\tau} - \mu\tau e^{-\mu\tau}}{\mu(1 - e^{-\mu\tau})}. \quad (13)$$

Число таких величин у часі очікування переходу визначається числом  $k$  пропущених автомобілів. За умови, що число пропущених за час очікування переходу автомобілів дорівнює  $k$ , умовне математичне сподівання для часу очікування переходу дорівнює

$$T_{\text{оч}}^{\tau}(k) = k \cdot M\zeta(\tau) = \frac{k}{\mu} \left( \frac{1 - e^{-\mu\tau} - \mu\tau e^{-\mu\tau}}{1 - e^{-\mu\tau}} \right). \quad (14)$$

Тоді середній час очікування переходу, коли час переходу дорівнює  $\tau$ , має вигляд

$$\begin{aligned} T_{\text{оч}} &= \sum_{k \geq 0} p_k \cdot T_{\text{оч}}^{\tau}(k) = \\ &= \frac{1}{\mu} \left( \frac{1 - e^{-\mu\tau} - \mu\tau e^{-\mu\tau}}{1 - e^{-\mu\tau}} \right) \cdot \sum_{k \geq 0} k p(\tau) \cdot [q(\tau)]^k, \end{aligned} \quad (15)$$

де  $T_{\text{оч}}$  – математичне сподівання часу очікування переходу пішоходом, с.

Залишається знайти лише суму ряду  $\sum_{k \geq 0} k p(\tau) \cdot [q(\tau)]^k$

$$\begin{aligned} \sum_{k \geq 0} k p q^k &= p \sum_{k \geq 1} q^k k = p q \sum_{k \geq 1} k q^{k-1} = \\ &= p q (1 + 2q + 3q^2 + 4q^3 + \dots + \\ &+ k q^{k-1} + \dots) = p q (1 + q + q^2 + q^3 + \\ &+ \dots + q + q^2 + q^3 + \dots + q^2 + q^3 + \\ &+ \dots + q^3 + \dots) = p q \sum_{k \geq 1} \left( \sum_{i \geq k-1} q^i \right) = \\ &= p q \sum_{k \geq 1} \frac{q^{k-1}}{1-q} = \frac{p q}{1-q} \sum_{k \geq 1} q^{k-1} = \frac{p q}{(1-q)^2} = \frac{q}{p}. \end{aligned} \quad (16)$$

Оскільки  $p = 1 - q$ , у результаті

$$T_{\text{оч}} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{1 - e^{-\mu\tau} - \mu\tau e^{-\mu\tau}}{1 - e^{-\mu\tau}} \right) \cdot \frac{q(\tau)}{p(\tau)}, \quad (17)$$

або

$$\begin{aligned} T_{\text{оч}} &= \frac{1}{\mu} \left( \frac{1 - e^{-\mu\tau} - \mu\tau e^{-\mu\tau}}{1 - e^{-\mu\tau}} \right) \cdot \frac{1 - e^{-\mu\tau}}{e^{-\mu\tau}} = \\ &= \frac{1}{\mu} (e^{\mu\tau} - 1 - \mu\tau). \end{aligned} \quad (18)$$

Ця формула описує залежність часу очікування переходу пішоходом дороги залежно від інтенсивності найпростішого транспортного потоку, за заданої та постійної тривалості переходу пішоходом дороги. Графічно, за умови, що час переходу пішоходом дороги дорівнює приблизному часу переходу дороги з двома смугами,  $\tau = 8$  с, значення середнього часу очікування пішоходом можливості переходу наведені на рис. 1.

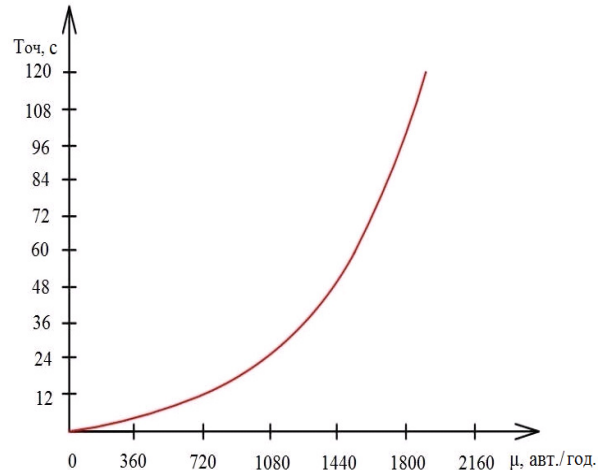


Рис. 1. Час очікування переходу пішоходом дороги залежно від інтенсивності транспортного потоку

Залежність (18) створює можливість для розрахунку загальних витрат учасників руху на подолання місця пересічення транспортного та пішохідного потоків у випадку відсутності пішохідного переходу на ділянці ВДМ. Завдяки відсутності у цьому випадку витрат часу автомобілістів, це досягається простим множенням часу очікування переходу випадково обраного пішохода  $T_{\text{оч}}$  на інтенсивність пішохідного потоку

$$T_{\Sigma} = T_{\text{оч}} \cdot \frac{\lambda}{3600}, \quad (19)$$

де  $T_{\Sigma}$  – загальні витрати учасників руху на подолання місця пересічення транспортного та пішохідного потоків у випадку відсутності пішохідного переходу на ділянці ВДМ за заданий проміжок часу, год/год;  $\lambda$  – інтенсивність пішохідного потоку, люд./год.

## Висновки

Розроблені на цей час моделі розрахунку показників ефективності транспортного проце-

су в місцях пересічення транспортних та пішохідних потоків та існуючі нормативні документи у цій сфері не надають проєктувальникам схем організації дорожнього руху чітких вказівок щодо ефективного використання різних форм організації взаємодії між потоками на перегонах ВДМ міст та регіонів.

Подолати цю проблему можна за рахунок формування аналітичних залежностей сумарних витрат часу пішоходів і транспортних засобів на подолання місць пересічення транспортних та пішохідних потоків залежно від їх інтенсивності, для різних способів організації руху: поза пішохідним переходом, на нерегульованих пішохідних переходах, на регульованих пішохідних переходах з викликальним пристроєм або без нього, з жорстким або гнучким циклом світлофорного регулювання.

Використання припущення про найпростіший потік транспортних засобів на перегоні ВДМ дозволяє отримати об'єктивну оцінку витрат часу пішоходів на пересічення вулиці або дороги у випадку відсутності пішохідного переходу, які для даного випадку характеризують витрати часу всіх учасників руху на подолання перешкоди, оскільки витрати часу водіїв та пасажирів ТЗ дорівнюють 0.

Недоліком отриманої моделі є постійна величина часу переходу пішоходом проїжджої частини, оскільки вона вочевидь залежить як від ширини ділянки ВДМ, що перетинається, так і від швидкості пішохода при переході, яка повинна розглядатися як випадкова величина. Врахування цих умов дозволить отримати аналітичну залежність, яка повністю визначає витрати часу учасників руху на пересічення вулиці або дороги у випадку відсутності на розглянутій ділянці пішохідного переходу.

### Література

1. Руководство по регулированию дорожного движения в городах. – М.: Стройиздат, 1974. – 97 с.
2. Методические рекомендации по регулированию пешеходного движения. – М.: ВНИИБДД МВД СССР, 1977. – 51 с.
3. Споруди транспорту. Вулиці та дороги населених пунктів: ДБН В.2.3-5-2001. – [Чинний від 2001-10-01]. – К.: Держбуд України, 2001. – 51 с.

4. Безпека дорожнього руху. Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосування та вимоги безпеки: ДСТУ 4092–2002. – [Чинний від 2002-06-03] – 31 с.
5. Правила Дорожнього руху України (із змінами, внесеними постановою Кабінету Міністрів України від 14.09.2016 № 641. Редакція діє з 29 вересня 2016 року). – Режим доступу: <http://pdd.ua>.
6. Толок О.В. Удосконалення нормативної бази застосування різних типів пішохідних переходів на перегонах міських вулиць / О.В. Толок, О.О. Божко, В.О. Уразбаєв, О. В. Калінін // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2014. – № 1. – С. 13–20. – Режим доступу: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>.
7. Рейцен Є. О. Науковий підхід до визначення граничних умов застосування різних типів пішохідних переходів на перегонах міських вулиць / Є. О. Рейцен, О. В. Толок, В. О. Уразбаєв // Містобудування та територіальне планування. – 2014. – Вип. 52. – С. 346–355. Режим доступу: <http://library.knu-knu-ba.edu.ua/books/zbirniki/02/201452.pdf>.
8. Слободчикова Н.А. Совершенствование организации дорожного движения на основе применения пешеходных вызывных устройств: дис. канд. техн. наук: 05.22.10 / Слободчикова Надежда Анатольевна. – Иркутск, 2010. – 174 с.
9. Симуль М.Г. Повышение безопасности дорожного движения в зонах пешеходных переходов на магистральных улицах: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта» / Симуль Мария Геннадиевна. – Омск, 2012. – 20 с.
10. Чикалин Е.Н. Повышение эффективности организации дорожного движения в зонах нерегулируемых пешеходных переходов : автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта» / Чикалин Евгений Николаевич. – Иркутск, 2013. – 20 с.
11. Гнеденко Б. В. Курс теорії ймовірностей: підручник / Б. В. Гнеденко. – 6-е вид., перероб. і доп. – М.: Наука. Гл. Ред. фіз.-мат. літ., 1988. – 56 с.



## References

1. *Rukovodstvo po regulirovaniju dorozhnogo dvizhenija v gorodah* [Guide to urban traffic regulation]. Moscow, Strojizdat Publ., 1974. 97 p.
2. *Metodicheskie rekomendacii po regulirovaniju peshehodnogo dvizhenija*. [Methodological recommendations for the regulation of pedestrian traffic]. Moscow, VNIIBDD MVD SSSR Publ., 1977. 51 p.
3. DBN V.2.3-5-2001. *Sporudy transportu. Vulytsi ta dorohy naselenykh punktiv* [State Standard 2.-3-5-2001. Constructions of transport. Streets and roads of settlements]. Kiev, Derzhbud Ukrainy Publ., 2001. 51 p.
4. DSTU 4092–2002. *Bezpeka dorozhn'oho rukhu. Svitlofory dorozhni. Zahal'ni tekhnichni vymohy, pravyla zastosuvannya ta vymohy bezpeky* [State Standard 4092–2002. Road safety. Traffic lights road. General technical requirements, application rules and safety requirements]. 31 p.
5. *Pravyla Dorozhn'oho rukhu Ukrainy iz zminamy vnesenymy postanovoyu Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 22.03.2017 № 161. Redaktsiya diye z 5 kvitnya 2017 roku* [Road Traffic Rules of Ukraine, as amended by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated March 22, 2017, No. 161. The edition is valid from April 5, 2017]. Available at: <http://pdd.ua> (accessed 17.05. 2016).
6. Tolok O.V., Bozhko O.O., Urazbayev V.O., Kalinin O.V. *Udoskonalennya normatyvnoyi bazy zastosuvannya riznykh typiv pishokhidnykh perekhodiv na perehonakh mis'kykh vulyts'* [Improvement of the normative base for the use of various types of pedestrian crossings on the sections of city streets]. *Visnyk Donets'koyi akademiyi avtomobil'noho transportu*, 2014, no. 1. Available at: <http://www.irbis-nbuy.gov.ua> (accessed 17.05. 2016).
7. Reytsen E.O., Tolok O.V. , Urazbayev V.O. *Naukovyy pidkhid do vyznachennya hranychnykh umov zastosuvannya riznykh typiv pishokhidnykh perekhodiv na perehonakh mis'kykh vulyts'* [Scientific approach to the definition of boundary conditions for the use of various types of pedestrian crossings on the sections of city streets]. *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya*, 2014, no. 52. Available at: <http://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/02/201452.pdf> (accessed 17.05. 2016).
8. Slobodchikova N.A. *Sovershenstvovanie organizacii dorozhnogo dvizhenija na osnove primenenija peshehodnykh vyzivnykh ustrojstv. Dys. kand. tekhn nauk* [Improving the organization of traffic on the basis of the use of pedestrian calling devices. Cand. eng. sci. diss.]. Irkutsk, 2010. 174 p.
9. Simul' M.G. *Povyshenie bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija v zonah peshehodnykh perekhodov na magistral'nykh ulicah. Avtoref. dys. kand. tekhn nauk* [Improving road safety in pedestrian crossing zones on main streets. Cand. eng. sci. abstract of the diss.]. Omsk, 2012. 20 p.
10. Chikalin E.N. *Povyshenie jeffektivnosti organizacii dorozhnogo dvizhenija v zonah nereguliruemymy peshehodnykh perekhodov. Avtoref. dys. kand. tekhn nauk* [Improving the efficiency of road traffic management in zones of unregulated pedestrian crossings. Cand. eng. sci. abstract of the diss.]. Irkutsk, 2013. 20 p.
11. Hnedenko B. V. *Kurs teorii ymovirnostey* [Course of probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 56 p.

Рецензент: Є.В. Нагорний, професор,  
д.т.н., ХНАДУ.